

# 모노펄스 레이더에 대한 교차극성 재밍 기법의 각도기반 모델링

유승형, 조병관, 박소령

가톨릭대학교

seunghy1468@catholic.ac.kr

## Modeling of the Angle Deception Using Cross-Polarization Jamming Against Monopulse Radar

Seung Hyeong Yoo, Byeong Gwan Jo, So Ryoung Park

The Catholic University of Korea

### 요약

본 논문은 표적의 방위각(azimuth angle)과 고도각(elevation angle)을 진폭 감지(amplitude sensing) 합-차(sum-difference) 방식으로 추정하여 목표물을 추적하는 모노펄스(monopulse) 레이더에 대하여 각도기반(angle deception) 기법 중 하나인 교차극성(cross-polarization) 재밍을 적용하는 시스템을 모델링하고, 레이더 각도 추적 오차의 시뮬레이션 결과를 제시한다.

### I. 서 론

모노펄스(monopulse) 레이더는 빔을 네 개의 영역으로 나누어 각각의 영역에서 표적에 반사되어 되돌아오는 신호의 진폭(amplitude)이나 위상(phase)을 분석하여 표적의 위치를 추적한다. 네 개 영역 신호의 합(sum)과 차(difference)를 계산하여 표적에 대한 방위각과 고도각 오차를 알 수 있으며, 이러한 오차를 보완하여 레이더의 빔 중심축이 표적을 계속 추적 할 수 있도록 한다[1],[2]. 현재 모노펄스 레이더에 효과적인 다양한 재밍 기법들이 활발하게 연구되고 있지만, 그 중 각도기반의 한 방법인 교차극성(cross-polarization) 재밍에 관한 연구는 상대적으로 적을 뿐 아니라 송수신 모델을 갖춘 시뮬레이션에 관한 연구는 더욱 적은 상황이다[3].

본 논문에서는 모노펄스 레이더와 교차극성 재밍 기법을 모델링하고 MATLAB 시뮬레이션을 통해 모노펄스 레이더에 대한 교차극성 재밍의 기반 성능을 분석한다.

### II. 본 론

본 논문에서는 어떠한 외부요인도 표적과 레이더에 영향을 끼치지 않으며, 레이더로부터 나오는 4개의 빔 모두 가우시안(Gaussian) 패턴이고, 오로지 각도기반 기법을 적용하지 않은 결과와 교차극성 재밍 기법을 적용한 결과를 비교하여 분석하는 것으로 가정한다. 모노펄스 레이더의 표적에 대한 하나의 빔 이득은 다음과 같다.

$$g(\theta) = g_0 e^{-2\ln 2(\theta/\theta_3)^2} \quad (1)$$

여기서  $g_0$ 은 빔 중심의 이득(gain),  $\theta_3$ 은 3dB 빔폭(bandwidth),  $\theta$ 는 표적과 빔 축이 이루는 각도를 뜻한다. 방위각을  $\theta_{az}$ , 고도각을  $\theta_{el}$ 로 나타낼 때, 오차가 작다고 가정하고 1사분면의 빔 이득을 구하면 다음과 같다.

$$g_1(\theta) = g(\theta_s) \exp [2\sqrt{2} \ln 2(\theta_s/\theta_3)(\theta_{az} + \theta_{el})/\theta_3] \quad (2)$$

여기서  $\theta_s$ 는 빔들의 중심축과 4개의 빔 축이 이루는 각도인 편각(squint angle)을 뜻하고 모노펄스 오차 기울기 계수는  $k_m = 2\sqrt{2} \ln 2(\theta_s/\theta_3)$ 이다.  $k_m(\theta_{az} + \theta_{el})/\theta_3 \ll 1$ 이라 가정하고 4개의 빔 이득을 모두 구하

면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} g_1 &= g_0 [1 + \frac{k_m}{\theta_3} (\theta_{az} + \theta_{el})], \quad g_3 = g_0 [1 - \frac{k_m}{\theta_3} (\theta_{el} + \theta_{az})] \\ g_2 &= g_0 [1 + \frac{k_m}{\theta_3} (\theta_{el} - \theta_{az})], \quad g_4 = g_0 [1 + \frac{k_m}{\theta_3} (\theta_{az} - \theta_{el})] \end{aligned} \quad (3)$$

또한,  $g_1, g_2, g_3, g_4$ 의 값이 각각  $a, b, c, d$  일 때, 방위각과 고도각의 변화량은  $\Delta_{az} = [(a+d) - (b+c)]/2$ 와  $\Delta_{el} = [(a+b) - (c+d)]/2$ 로 나타낼 수 있다. 모노펄스 레이더의 안테나로 수신된 신호의 크기를  $A$ 라고 할 때, 위상각과 고도각을 다음과 같이 추정하여 빔의 중심축을 이동함으로서 표적을 추적한다.

$$\theta_{az} = \frac{\Delta_{az}\theta_3}{2g_0k_mA}, \quad \theta_{el} = \frac{\Delta_{el}\theta_3}{2g_0k_mA} \quad (4)$$

다음으로 모노펄스 레이더를 무력화시키는 방법인 교차극성 재밍 기법을 사용했을 때, 빔의 축은 그림 1과 같이 표적의 위상과  $180^\circ$  만큼 차이가 나는 방향으로 유도되어 나타나고, 이때 레이더의 방사 패턴은 아래 식과 같이 나타난다[4].

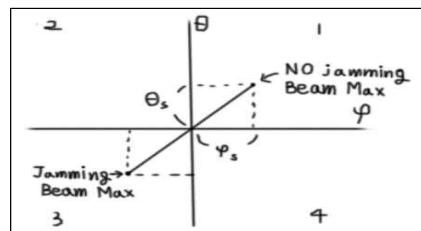


그림 1. 빔 중심축을 원점으로 두었을 때, 빔 최대값의 위치

$$g_n(\theta, \varphi) = g_n(\theta_s, \varphi_s)(1 + k_{n\theta}\Delta\theta + k_{n\varphi}\Delta\varphi) \quad (5)$$

$$|g_p(\theta, \varphi)| = |g_p(\theta_s, \varphi_s)|(1 + k_{p\theta}\Delta\theta + k_{p\varphi}\Delta\varphi) \quad (6)$$

여기서  $\theta_s$ 는 고도각,  $\varphi_s$ 는 방위각,  $g_n$ 은 방사 패턴의 실수 부분,  $g_p$ 는 방사 패턴의 허수 부분을 의미하고  $k_{n\theta}, k_{n\varphi}, k_{p\theta}, k_{p\varphi}$ 는 오차 기울기 계수를 뜻하며 표 1에서의 값을 계수로 사용한다[4].

표 1. 오차 기울기 계수

안테나	$k_{n\theta}$	$k_{n\varphi}$	$k_{p\theta}$	$k_{p\varphi}$
1	-1	-1	1	1
2	-1	1	1	-1
3	1	1	-1	-1
4	1	-1	-1	1

따라서 교차극성 재명 기법을 적용했을 때, 모노펄스 레이더 측에서 받는 신호의 이득은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} g_{p1} &= -g_1(1+k_{p\theta}\theta+k_{p\varphi}\varphi), \quad g_{p2} = g_2(1+k_{p\theta}\theta-k_{p\varphi}\varphi) \\ g_{p3} &= -g_3(1-k_{p\theta}\theta-k_{p\varphi}\varphi), \quad g_{p4} = g_4(1-k_{p\theta}\theta+k_{p\varphi}\varphi) \end{aligned} \quad (7)$$

본 논문에서는 안데나와 표적의 중심축이 일직선상에 위치할 때, 방위각과 고도각의 좌표가 (0,0)인 지점을 표적의 시작지점으로 하여 방위각을 양의 방향으로  $0.5 \text{ deg/s}$ , 고도각을 음의 방향으로  $0.5 \text{ deg/s}$ 씩 변화시키고 교차극성 재밍 기법을 10초간 실시한 후 종료한다. 레이더의 기본 각도 추정 오차는 [5]의 시뮬레이션 결과에서 얻은 평균 오차를 사용하였다. 그림 2, 3, 4는 이러한 교차극성 재밍을 모노펄스 레이더에 적용하였을 때의 결과를 MATLAB으로 시뮬레이션한 결과를 나타낸다.

먼저 그림 2에서 2사분면과 4사분면에 표시된  $t_1$ 과  $t_2$ 들은 각각 같은 시점을 나타내며,  $t_1 < t_2$ 라고 가정한다. 표적이 4사분면의  $t_2$  방향으로 일정하게 이동할 때, 레이더의 범 측이 표적을 올바르게 따라가고 있는 모습과, 레이더 범 측이 재밍으로 인하여 2사분면의  $t_2$  방향으로 유도된 모습을 나타내고 있으며 시간에 따라 표적으로부터 점점 멀어지고 있음을 볼 수 있다.

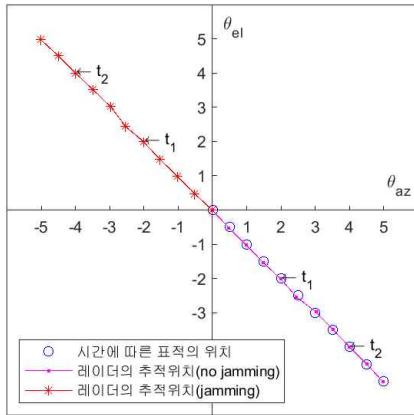


그림 2.  $A = 1$ 일 때 표적의 방위각 및 고도각 추정 결과

그림 3은 안데나에서 수신된 신호의 크기  $A$ 를 변화시켜 각도기만 기법을 적용한 그림이다. 그림 3과 비교했을 때, 동일한 시점( $t_1$  및  $t_2$ ) 동안 각도기만 기법을 적용한 위상의 변화가 감소하는 모습을 보여주고 있다.

그림 4는 재밍을 적용하지 않았을 경우의 방위각 RMSE(root mean squared error)와 재밍을 적용했을 경우의 방위각 RMSE를 동시에 나타내었다. 재밍을 적용하지 않을 경우, 레이더가 표적을 오차 없이 추적하고 있어서 RMSE가 0으로 수렴한다. 그러나 재밍을 적용한다면 레이더의 빔 축이 표적의 위상과  $180^{\circ}$  만큼 차이나도록 유도되어서 시간에 따라 RMSE는 점점 증가하는 양상을 보인다. 그러나 여기서  $A$ 가 클수록 시간에 따른 RMSE의 변화량은 감소하는데,  $A$ 가 클수록 식 (4)에서의  $\theta_{az}$  와  $\theta_{el}$ 가 감소한다. 즉, 식 (7)에서의  $\theta$ 와  $\varphi$ 가 감소하게 되어 교차곡성 재밍 기법을 적용한 모노펄스 레이더 측에서 받는 신호 이득에 영향을 미치기 때문이다.

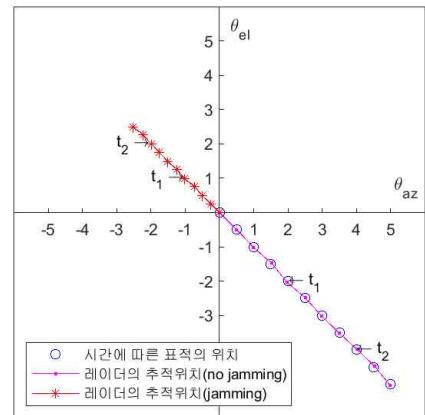


그림 3.  $A = 3$ 일 때 표적의 방위각 및 고도각 추정 결과

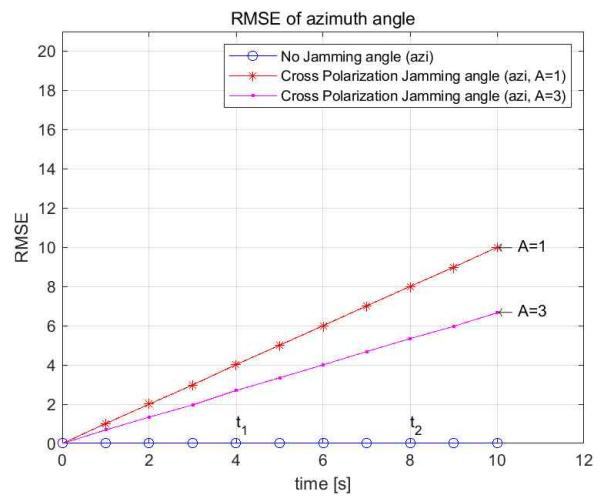


그림 4. 표적의 방위각에 대한 RMSE

### III. 결 론

본 논문에서는 전자전 상황에서 위협체인 모노펄스 레이더와 각도를 기반하는 재밍 방법의 하나인 교차극성 재밍 기법을 모델링하고 재밍의 결과를 시뮬레이션으로 보였다. 본 논문에서 제시하는 시험 환경과 측정을 통해 향후 모노펄스 레이더에 대한 교차극성 재밍 시스템을 구현하는 데 있어서 기초 자료로 활용될 것이라 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] 강병욱, 권혁자, 이영진, “단일 채널 모노펄스 시스템의 구현 및 성능 검증”, 한국전자과학회논문지, 900~908쪽, 2016년 10월.
  - [2] H. Han, X. Xu, H. Wang, and H. Dai, “Analysis of cross-polarization jamming for phase comparison monopulse radars”, IEEE Int. Conf. Electron. Inform. Commun. Techn. (ICEICT), pp. 404~407, 2019.
  - [3] 권재완, 정희창, 박소령, 노상숙, “복합 전자 공격에 대한 레이더 추적 성능 분석”, 한국통신학회 추계학술대회논문집, 38~39쪽, 2018년 11월.
  - [4] August Golden, Radar Electronic Warfare, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), Washington, DC, 1987.
  - [5] S.R. Park, I. Nam, and S. Noh, “Modeling and simulation for the investigation of radar responses to electronic attacks in electronic warfare environments”, Security and Communication Networks, Vol. 2018, Article ID 3580536, 13 pages, April 2018.